Абракітов В.Е. Хитрощі звукоізолюючої панелі із максимально можливою звукоізолюючою здатністю… // Строительство, материаловедение, машиностроение. Сб. научн. трудов. Вып. 40. - Днепропетровск: ПГАСА, 2007. - С. 126-132.

УДК 654.927, 654.928

ХИТРОЩІ ЗВУКОІЗОЛЮЮЧОЇ ПАНЕЛІ ІЗ МАКСИМАЛЬНОЮ ЗВУКОІЗОЛЮЮЧОЮ ЗДАТНІСТЮ...

к.т.н., доцент В.Е. Абракітов
Харківська національна академія міського господарства

Найголовнішим критерієм, що визначає ефективність заходів боротьби із шумом, є підвищення звукоізолюючої здібності шумозахисних засобів.

В 1997 р. автором цієї статті зроблений винахід "Звукоізолююча панель з максимально можливою звукоізолюючою здатністю" [1]. Таким чином, здійснене рекордне технічне досягнення, (яке сміливо може претендувати на те, наприклад, щоб бути занесеним в відому "Книгу рекордов Гиннеса"). В якості внутрішнього середовища в [1] застосований вакуум, що не пропускає звук. Між тим, конструкції різного роду звукозахисних пристроїв, що містять всередині вакуум, були відомі ще задовго до [1] (аналоги, прототип нашого винаходу,та ін. ([2]))? Але досягнути саме максимальної звукоізолюючої здатності вони виявилися не в змозі. Слабким місцем тих конструкцій є проходження структурного звуку в конструкціях корпусу (або оболонки), що містить вакуум. Звук, дійсно, зовсім не проходить крізь вакуумований простір, - зате проходить повз нього по твердому середовищу його оболонки. Наявність такого обхідного шляху нівелює всі переваги затримання звуку вакуумом у внутрішній порожнині, - бо принципово неможливо утворити таку порожнину без її оболонки? Таким чином, є потреба в зменшенні структурного звуку на стінках.

Між тим, в конструкції панелі [1] переборено упередження фахівців про неможливість досягнення такого вагомого, граничного технічного результату, як ***максимально можлива*** звукоізолююча здібність. Але ж чим відрізняється, наприклад, [1], від інших своїх аналогів, наприклад, [2], що також застосують вакуум задля підвищення своєї звукоізолюючої здатності?

Умови технічного завдання зменшення структурного шуму в оболонці вакуумованої порожнини полягали в тому, що звукова хвиля падає з атмосферного повітря під кутом Θ на поверхню звукоізолюючої конструкції, що складається з декількох шарів матеріалу, при тому третій шар матеріалу є таким, що абсолютно відбиває. Потребується зменшити проходження структурного звуку в першому та другому шарах матеріалу. Такій умові, наприклад, відповідає конструкція [1], що має стінки з твердого матеріалу (шар 2, (а також і шар 4)), між якими міститься вакуум (шар 3). На передній поверхні стінки, згідно за формулою винаходу, нанесене додаткове звукопоглинаюче покриття (шар 1).

Абракітов В.Е. Хитрощі звукоізолюючої панелі із максимально можливою звукоізолюючою здатністю… // Строительство, материаловедение, машиностроение. Сб. научн. трудов. Вып. 40. - Днепропетровск: ПГАСА, 2007. - С. 126-132.

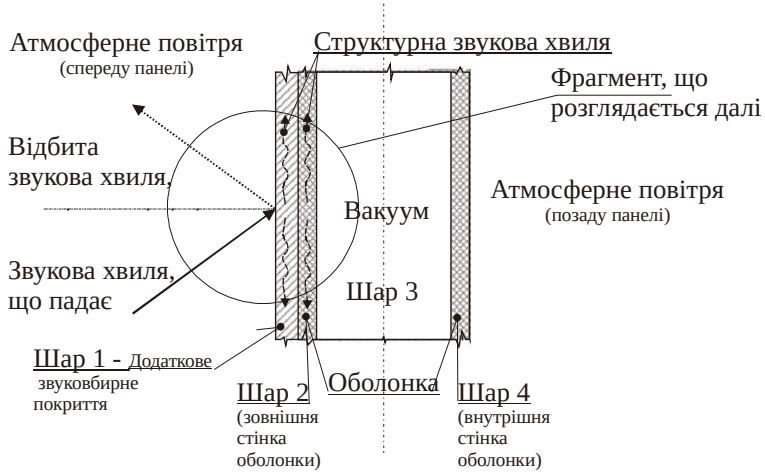

Рис. 1. Фрагмент звукоізолюючої панелі з максимально можливою звукоізолюючою здатністю [1] в поперечному розтині. З такої п’ятишарової конструкції далі розглядаємо тільки половину (шари 1-3), оскільки джерело шуму знаходиться із одного боку панелі; а з іншого – об’єкт, що захищається; і зворотний напрямок (у т.ч. шар 4 – зворотний бік оболонки, що показаний на кресленні, та дійсно необхідний задля зберігання вакууму) нас не цікавить. В будь-якому разі вакуум (шар 3) затримує звук всередині. Мова в цій роботі йде про зменшення саме структурного звуку на стінках корпусу.

Таким чином, конструкція поверхні, куди влучає звукова хвиля, має три шари: звукопоглинаюче покриття (перший шар; індекс $_1$); твердий матеріал (другий шар; індекс $_2$); вакуум (третій шар; індекс $_3$). Звукові хвилі в вакуумі не розповсюджуються, тобто третій шар є таким, що абсолютно відбиває всю енергію звукової хвилі. Товщини шарів позначені як d_1, d_2, d_3; (при тому товщина d_3 для розглядуваного в цій статті випадку не відіграє ролі; (але якщо це комусь потрібно: за формулою [1] у внутрішній порожнині панелі забезпечена наявність середнього вакууму, що характеризується рівністю чи незначним перевищенням довжини вільного пробігу молекул *1* над найменшою відстанню d_3 між стінками внутрішньої порожнини)).

Якщо амплітуда звукового тиску в хвилі, що падає, дорівнює $P_{\text{початк}}$, то при перетинанні першої границі розподілу середовищ, тобто при падінні з повітря на шар 1 (початок тривимірної системи координат *XOУ* розташовано на границі розподілу середовищ 2 та 3, оскільки d_3 тут не відіграє ролі):

$$P_{1\text{пад}} = P_{\text{початк}} \cdot e^{i \cdot k_0 (-x \cdot \sin\Theta + y \cos\Theta)},$$

Абракітов В.Е. Хитрощі звукоізолюючої панелі із максимально можливою звукоізолюючою здатністю... // Строительство, материаловедение, машиностроение. Сб. научн. трудов. Вып. 40. - Днепропетровск: ПГАСА, 2007. - С. 126-132.

$$P_{1\text{відб}} = \rho_1 \cdot P_{\text{початк}} \cdot e^{i \cdot k_0 (-x \cdot \sin\Theta - y\cos\Theta)},$$

$$P_{1\text{проп}} = \tau_1 \cdot P_{\text{початк}} \cdot e^{i \cdot k_0 (-x \cdot \sin\Theta + y\cos\Theta)}$$

Несуттєве зауваження: $P_{1\text{пад}}$ та $P_{1\text{відб}}$ розповсюджуються попереду границі розподілу «*повітря – шар 1*»; а $P_{1\text{проп}}$ - позаду неї, тобто у шарі 1. За аналогією, $P_{2\text{пад}}$ (= $P_{1\text{проп}}$) та $P_{2\text{відб}}$ розповсюджуються попереду границі розподілу «*шар 1 – шар 2*», тобто в шарі 1; а $P_{2\text{проп}}$ - позаду неї, тобто у шарі 2. $P_{3\text{пад}}$ (= $P_{2\text{проп}}$) та $P_{3\text{відб}}$ розповсюджуються попереду границі розподілу «*шар 2 – шар 3*», тобто в шарі 1; а $P_{3\text{проп}}$ (що дорівнює 0) - позаду неї, тобто у шарі 3.

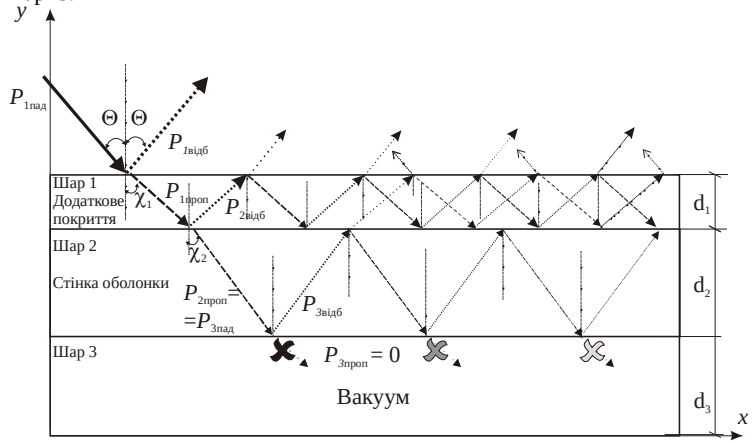

Рис. 2. Складна хвильова картина всередині стінок [1]. Всього одна хвиля, що падає, розбивається на значну кількість пропущених, переломлених, відбитих компонент. Багаторазові відбиття проходять в межах шарів 1 та 2.

Яким чином будуть розповсюджуватися звукові хвилі в шарі 1? Тут хвильове поле, за аналогією за попередніми побудовами, сформують хвилі $P_{2\text{пад}}$, $P_{2\text{відб}}$, та їхні наступні багаторазові відбиття При тому $P_{2\text{пад}} = P_{1\text{проп}}$ (задля спрощення ми відкидаємо надмірне позначення $P_{2\text{пад}}$ - воно зайве). Компонент $P_{2\text{проп}}$ пройде крізь границю розподілу. На другій границі розподілу «*шар 1- шар 2*» усередині твердого матеріалу корпусу процес відбувається повторно; та хвильове поле в шарі 2 сформують хвилі $P_{3\text{пад}}$, $P_{3\text{відб}}$. При тому $P_{3\text{пад}} = P_{2\text{проп}}$.

$P_{3\text{проп}}$ буде дорівнювати 0, оскільки третій шар являє собою вакуум, і звукові хвилі, як відомо, в ньому не розповсюджуються.

Абракітов В.Е. Хитрощі звукоізолюючої панелі із максимально можливою звукоізолюючою здатністю... // Строительство, материаловедение, машиностроение. Сб. научн. трудов. Вып. 40. - Днепропетровск: ПГАСА, 2007. - С. 126-132.

$$P_{\text{Звідб}} = \tau_1 \cdot P_{\text{початк}} \cdot e^{i \cdot k_0 (-x \cdot \sin\Theta - y \cos\Theta)}$$

Іншим чином, $P_{\text{Звідб}} = P_{\text{2пад}}$, тобто це означає, що цей компонент хвилі, що пропущений скрізь шар 1 в товщу шару 2, але повністю відбитий від шару 3, містить в собі всю енергію звукової хвилі.

Розглянемо далі, що ж з ним станеться? При тому координата по осі $y = d_2$:

$$P_{\text{2проп}} (y = d_2) = \tau_1 \cdot P_{\text{початк}} \cdot e^{i \cdot k_0 (-x \cdot \sin\Theta + y \cos\Theta)};$$

$$P_{\text{Звідб}} (y = d_2) = \tau_1 \cdot P_{\text{початк}} \cdot e^{i \cdot k_0 (-x \cdot \sin\Theta - y \cos\Theta)}.$$

Чому ж ми спочатку кажемо, що $P_{\text{Звідб}} = P_{\text{2проп}}$, а потім розрізняємо їх між собою? Справа в тому, що ми розглядаємо не короткочасний звуковий імпульс, а надходження звукової енергії у шари панелі протягом деякого проміжку часу. При тому $P_{\text{Звідб}}$ характеризує енергію попередньої хвилі, а $P_{\text{2проп}}$ - наступної; вони рівні між собою, це природно; але ж вони існують одночасно, доки $P_{\text{Звідб}}$ не згасла, а $P_{\text{2проп}}$ ще надходить; отже, вони накладаються одна на одну, та взаємодіють?!

Якщо розглянути відношення цих хвиль для площини $y = d_2$, то можемо одержати:

$$P_{\text{Звідб}} / P_{\text{2проп}} = e^{-z \cdot i \cdot k_0 \cdot d_2 \cdot \cos\Theta}.$$

Згідно визначення, відношення відбитої енергії хвилі до тієї енергії, що падає, є коефіцієнт відбиття. Отже, ми одержали коефіцієнт відбиття в площині d_2, тобто в шарі 2.

Модуль коефіцієнта, що одержаний, дорівнює одиниці, а фаза компоненти хвилі в шарі 2:

$$\varphi = 2 \cdot k_0 \cdot d_2 \cdot \cos\Theta.$$

Це являє собою накладання фаз при розповсюдженні хвилі в хвильовому проміжку, тобто від поверхні y=0 (границя розподілу середовищ "шар 2 - шар 3" до границі розподілу "шар 1 - шар 2" ($y=d_2$) и в зворотному напрямку, після відбиття від границі "шар 1 - шар 2". Промінь випробує багаторазове відбиття, та при тому, природно, переміщується вздовж осі x. Таке переміщення визначається як

$$\Delta = \frac{\partial \varphi}{\partial k x_x}$$

$$\varphi = 2 \cdot k_2 \cdot d_2,$$

$$\left| \frac{\partial \left(\sqrt{k_0^2 - k_x^2} \right)}{\partial k x_x} \right| = y \cdot d_2 \cdot \text{tg}\Theta.$$

Абракітов В.Е. Хитрощі звукоізолюючої панелі із максимально можливою звукоізолюючою здатністю… // Строительство, материаловедение, машиностроение. Сб. научн. трудов. Вып. 40. - Днепропетровск: ПГАСА, 2007. - С. 126-132.

При геометричній побудові виходить точно такий же результат, тобто

$$\Delta = y \cdot d_2 \cdot \mathrm{tg}\Theta.$$

Адекватні результати при вивченні подібного явища одержані іншими дослідниками [3], [4]; а також [5].

Можливо підібрати товщину шару d_2 таким чином, щоб промінь $P_{\text{Звідб}}$, при зворотному русі всередині шару 2, влучив у вузол коливань шару d_1. Це буде залежати, насамперед, від первісного куту падіння Θ на границю "*повітря - шар 1*", кутів переломлення χ_1 та χ_2 на границях розподілу середовищ "*повітря - шар 1*"; "*шар 1- шар 2*".

Якщо шар 2 має однакову товщину, тобто поверхні шарів 1 та 3 паралельні, одержимо повторне влучення повторно відбитого променю у відповідний вузол. Слово «кожний», звісно, до цих «променів» та «вузлів» не застосовуване: (з нашого рис. 2 явно випливає що лише третій з відбитих променів в шарі 2 влучає в місце влучення четвертого відбитого променю в шарі 1. Це обумовлено тим, що кут первісного падіння Θ та кути падіння на кожну подальшу границю розподілу не рівні між собою; то є загальновідомі наслідки закону Снеліуса). Але все ж таки має місце таке влучання деяких променів; завдання конструктора звукоізолюючого засобу – зробити їх як можна частішими?!

Ці ділянки (тобто самі місця вузлів коливань) не випробують коливань; коливання (у формі вигинових та інших форм хвиль йдуть по шару 1 в інших місцях (між вузлами). Таким чином, інтерференційні явища, тобто збільшення/зменшення коливань шару 1, не будуть мати місце.

Хвиля, що туди падає, відбиватиметься назад із тією ж амплітудою та фазою. Це є самоузгодження хвильових полів, що призводить до виникнення хвиль, що стоять, із неминучими резонансними явищами в товщі шару 2, - і, в кінцевому разі - до збільшення щільності звукової енергії.

Це є керований процес, а примусове управління їм здійснюється за рахунок підбору товщі шару d_2. При різній товщині шару d_2 місце відбиття променю знаходиться у відповідних різних місцях границі розподілу середовищ "шар 2 - шар 3", змінюючись за координатою по осі x.

Абракітов В.Е. Хитрощі звукоізолюючої панелі із максимально можливою звукоізолюючою здатністю... // Строительство, материаловедение, машиностроение. Сб. научн. трудов. Вып. 40. - Днепропетровск: ПГАСА, 2007. - С. 126-132.

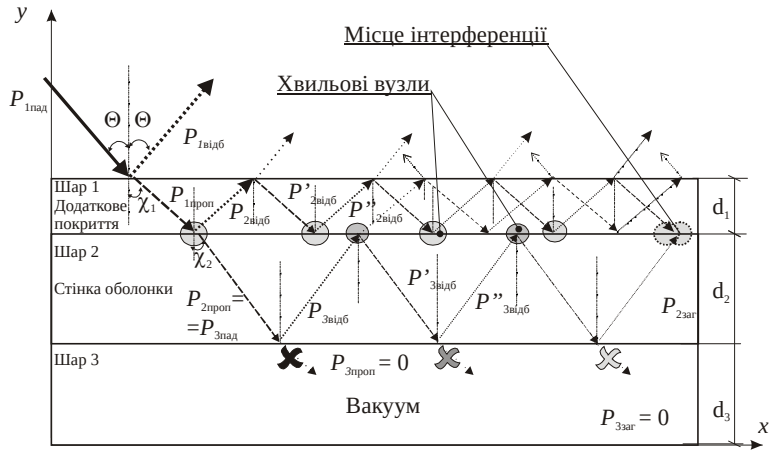

Рис. 3. Самоузгодження хвильових полів в середнім шарі тришарової конструкції за рахунок накладення різних відбитих променів один на одного.

Амплітудні характеристики звуку в шарі 2 визначаються амплітудними характеристиками $P_{2проп}$ та $P_{2відб}$. Загальна амплітудна характеристика $P_{2заг}$, розрахована із зменшенням $P_{2відб}$ при кожному повторному відбитті ($P'_{2відб}$; $P''_{2відб}$; …) за рахунок інтерференційних явищ (влучення в місця попадання променів ($P'_{1відб}$; $P''_{1відб}$;):

$$P_{2заг} = P_{2проп} + P_{2відб} = \tau_1 \cdot P_{початк}[\, e^{i \cdot k_0 (-x \cdot \sin\Theta + y \cos\Theta)} + e^{i \cdot k_0 (x \cdot \sin\Theta + y \cos\Theta)} \,]$$

$$P_{2заг} = \tau_1 \cdot P_{початк} \cdot e^{-i \cdot k_0 \cdot x \cdot \sin\Theta} \,[\, e^{i \cdot k_0 \cdot y \cdot \cos\Theta} + e^{-i \cdot k_0 \cdot y \cdot \cos\Theta} \,]$$

$$P_{2заг} = 2 \cdot \tau_1 \cdot P_{початк} \cdot \cos(k_0 \cdot y \cdot \cos\theta) \cdot e^{-i \cdot k_0 \cdot x \cdot \sin\Theta} = P_{(y)} \cdot e^{-i \cdot k_0 \cdot x \cdot \sin\Theta}$$

Таким чином, амплітудні параметри звукової хвилі всередині шару твердого матеріалу 2 є функцією просторової координати y. Щоб знайти екстремальне значення цієї амплітуди, проводимо диференціювання за y:

$$\frac{\partial P_{(y)}}{\partial y} = -2 \cdot \tau_1 \cdot k_0 \cdot P_{початк} \cdot \cos\theta \cdot \sin(k_0 \cdot y \cdot \cos\theta)$$

Для умови экстремуму

$$\frac{\partial P_{(y)}}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial P_{(y)}}{\partial y} = -2 \cdot \tau_1 \cdot k_0 \cdot P_{\text{початк}} \cdot \cos\theta \cdot \sin(k_0 \cdot y \cdot \cos\theta) = 0$$

$$\sin(k_0 \cdot y \cdot \cos\theta) = 0$$

Умова максимуму амплітуди $k_0 \cdot y \cdot \cos\theta = \pi \cdot K$, де К – любе ціле число: (К = 0; 1; 2; 3; … *n*) – (що являє собою умову інтерференції).

Задля знайдення куту повного внутрішнього відбиття хвилі $\theta = \Theta_{\text{гранічне}}$ необхідно дорівняти $y=d_2$:

$$k_0 \cdot d_2 \cdot \cos\theta = \pi \cdot K$$

$$\cos\theta = \frac{\pi \cdot K}{k_0 \cdot d_2}$$

Взаємозв'язок кута падіння і кута переломлення при повному внутрішнім відбитті хвиль (в загальному вигляді) описано в роботах [6, 7, 8].

Таким чином, на підставі власних досліджень, а також адекватного ствердження незалежного дослідження А.А. Кочкина [5], можна констатувати, що самоузгодження хвильового полю в проміжку між двома шарами матеріалу, при дотриманні вищеназваних умов, цілком можливе та може бути досягнуто. За рахунок того само узгодження значно зменшується частка структурного звуку в елементах конструкції, і, таким чином, підвищується її звукоізолююча здатність. Це в офіційному порядку зафіксовано патентом Росії [1].

Література

1. Патент № 2083775 (Россия). Звукоизолирующая панель с максимально возможной звукоизолирующей способностью / Абракитов В.Э. - МПК6 Е04В 1/82. Опубл. 10.07.97. М.: Изобретения (Заявки и патенты): Официальный бюллетень, 1997, № 19.

2. Абракитов В.Э., Карпалюк И.Т. Звукоизолирующий элемент. Информационный листок ИЛ №75-95.Харьков: ХОРПНТЕІ, 1995.

3. Юферов А.П. Повышение звукоизоляции двухстенных конструкций в зданиях. Дисс....канд. техн. наук. - Нижний Новгород, 1997. - 136 с.

4. Beranek L., Work G. Sound Transmission through Multiple Structures Containing Flexible Blankets // J.Acoust. Sok.Amer. - 1949. - 21. - P. 419.

5. Кочкин А.А. Процесс самосогласования волнового поля воздушного промежутка // Материалы научно-технического семинара «Актуальные проблемы акустической экологии и защиты от шума». Севастополь, 2006. – С. 41 – 44.

6. Абракитов В.Е. На шляху до наукових відкриттів. Монографія. Х.: Парус, 2007.

Абракітов В.Е. Хитрощі звукоізолюючої панелі із максимально можливою звукоізолюючою здатністю… // Строительство, материаловедение, машиностроение. Сб. научн. трудов. Вып. 40. - Днепропетровск: ПГАСА, 2007. - С. 126-132.

7. Абракитов В.Э. Аналоговое и квазианалоговое моделирование процессов распространения звука в пространстве для прогнозирования шумового режима на защищаемом объекте. – Х.: АО ХГПИ, 1997. – 40 с.

8. Абракітов В.Э. Аналогове та квазіаналогове моделювання процесів розповсюдження звуку в просторі для прогнозування шумового режиму на об`єкті, що захищається. Друге видання, перероблене та доповнене. – Харків: 2007. – 104 с.